

Supervision des procédés : du discret au discontinu

Robert VALETTE*, Hervé PINGAUD**

*LAAS CNRS, 7 Av. du Colonel Roche, 31077 Toulouse Cedex

Tel : 05 61 33 64 09, Email : robert@laas.fr

** LGC CNRS, INP/ENSIGC, 18 Chemin de la loge 31078 Toulouse Cedex

Tel : 05 62 25 23 56, Email : Herve.Pingaud@ensigct.fr

Résumé

La supervision est un niveau fonctionnel reconnu du système de commande qui prend en charge le pilotage et la surveillance de l'installation. Elle joue un rôle clé dans le cadre d'une commande avancée parce qu'elle dispose d'une vision globale du comportement du système physique. L'exploitation de cette connaissance du système au moyen de modèles de représentation est discutée. La surveillance des procédés batchs est plus spécifiquement définie. Les liens avec d'autres fonctions du système de commande sont illustrés au moyen de quelques exemples.

I. Le système de commande

Le système de commande est articulé autour d'un ensemble de fonctions variées et couplées. Il est classiquement présenté sous forme d'une hiérarchie de niveaux fonctionnels (cf. figure 1).

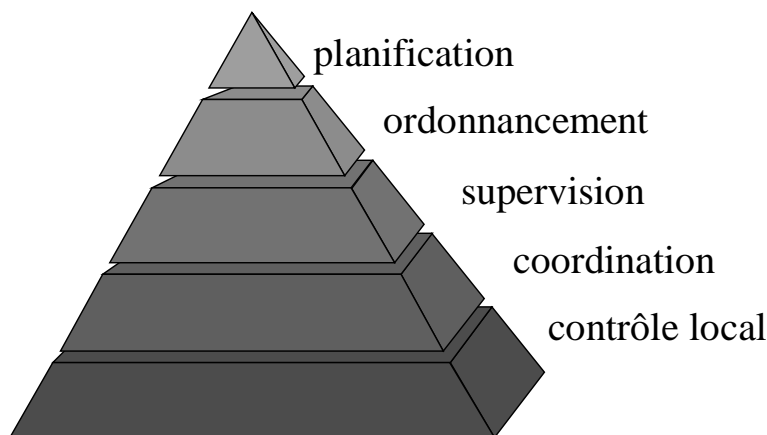


Figure 1 - Décomposition hiérarchique du système de commande

Ce système de commande transporte, et transforme, de l'information ayant trait à la fabrication des produits et à l'outil de production. Ce flux d'informations est bidirectionnel : depuis la gestion de production jusqu'à la commande locale des équipements pour la mise en œuvre des consignes au moyen d'un flux de décisions (consignes) ; depuis la commande locale jusqu'à la gestion de production, à contre courant du flux précédent, pour l'observation de l'état et les compte rendus d'exécution des consignes.

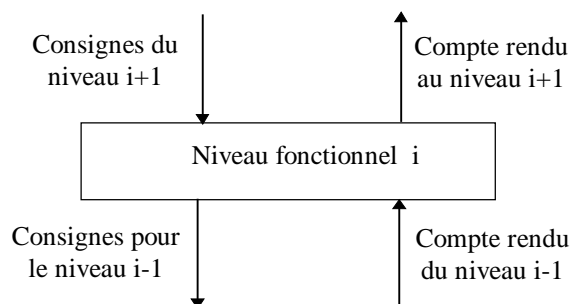


Figure 2 - Définition d'un niveau fonctionnel

Chaque niveau reçoit donc deux flux d'information entrants et émet deux flux sortants. Son rôle est de transformer les variables de consigne du niveau supérieur en consignes pour le niveau inférieur, connaissant l'état de ce niveau, dans un délai de temps cohérent avec le type de décisions. C'est la vision classique du système en boucle fermée utilisée couramment pour les régulateurs locaux continus. L'émission d'un compte rendu vers le niveau supérieur est un second rôle justifié par la décomposition afin de ne pas isoler les niveaux supérieurs. Il doit faire remonter l'information utile à chaque niveau et permet ainsi d'effacer progressivement les perturbations.

Le niveau supérieur relève donc de la gestion de production et reçoit des informations stratégiques et tactiques de l'entreprise. Il remplit des fonctions de calcul pour affecter des ressources matérielles et humaines à des tâches de fabrication, ce sont les algorithmes de planification et d'ordonnancement de la production à court terme.

A l'autre extrémité du système de commande, directement en prise avec le système physique au niveau le plus bas, les boucles de contrôle local réalisent le pilotage des équipements. Ce sont les fonctions de régulation continue et les automatismes logiques [1].

Placée à un niveau intermédiaire, la supervision remplit deux fonctions principales.

La première correspond au **pilotage**, c'est-à-dire à la mise en oeuvre des consignes reçues de la gestion de production qui, en fonction d'un paramétrage propre aux produits (recettes) et au procédé (configuration de l'installation) traduit cette information et la distribue aux contrôleurs locaux. Les objectifs poursuivis sont la qualité, la productivité et la tenue des délais. La seconde fonction est la **surveillance**. Elle veille au bon déroulement du pilotage en vérifiant de manière récurrente la conformité de l'évolution dynamique des transformations physiques sur le système de production connaissant les évolutions passées, dans le but d'assurer la sécurité des hommes et des biens, le respect de l'environnement et de consolider le pilotage.

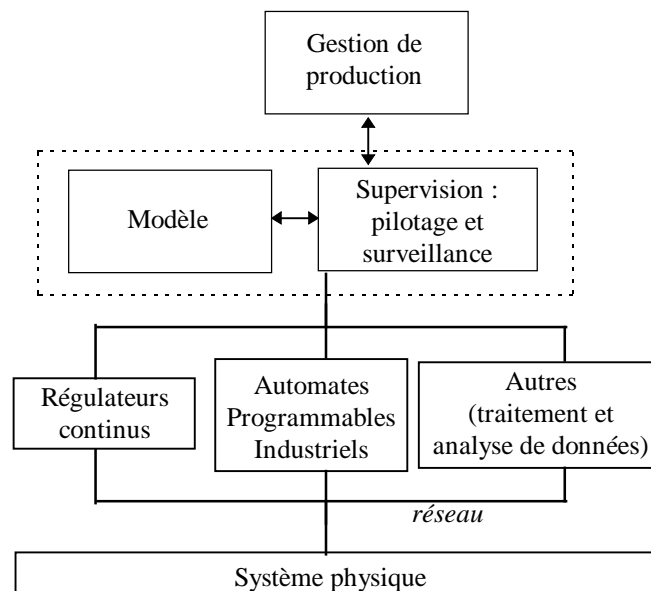


Figure 3 - Architecture informatique du système de commande

Quelle que soit l'architecture informatique (systèmes centralisés ou distribués) du système de contrôle/commande, la décomposition se retrouve au niveau matériel comme le montre la figure 3 [2]. La supervision se fait au moyen d'un ou plusieurs processeurs numériques supportant le pilotage et la surveillance. Dans la salle de contrôle, une interface homme-machine permet d'accéder au paramétrage du superviseur et d'assurer la surveillance.

Il faut prendre en compte les informations venant du terrain pour rafraîchir les valeurs des variables d'état au niveau de la supervision. La scrutation du réseau de terrain se fait de manière synchrone au niveau local car, d'une part, les régulateurs locaux ont besoin d'un échantillonnage régulier pour assurer le suivi des variables réelles en fonction du temps et, d'autre part, les automates programmables doivent surveiller le changement des signaux tout ou rien à une fréquence élevée pour cerner précisément la date d'un événement. Toutefois, si le rafraîchissement des données continues au niveau supervision nécessite également un échantillonnage régulier, le traitement asynchrone est légitime pour la partie discrète puisque les automates transmettent l'information uniquement si la logique programmée a déclenché une transition d'état.

Si le pilotage est une fonction essentielle dont la spécification inclut souvent une volonté d'autonomie vis à vis des opérateurs (source de reproductibilité), il n'en est pas de même pour la surveillance où l'homme est actuellement considéré comme l'élément **intelligent** de la boucle. C'est la gestion de l'imprévu et de l'incertain [3]. Ses moyens de réaction, suite à une défaillance ou une dérive, sont des modes "semi-automatique" ou "manuel" de pilotage. Il a éventuellement reçu une formation au moyen de simulateurs d'entraînement, et/ou est assisté par une aide en ligne.

Le terme de "**commande avancée**" qui qualifie cette journée de conférences nous incite à développer des sujets dont le contenu, en termes d'Automatique, quitte le domaine de l'application classique. L'originalité doit résider dans les choix scientifiques à la base de la conception du système de contrôle, et se démontrer par la maîtrise de systèmes physiques délicats à contrôler. Ainsi, une majorité d'articles est consacrée au pilotage, et plus particulièrement à la régulation locale continue d'équipements qui réalisent telle ou telle opération unitaire.

Mais, appliqué à la supervision, l'adjectif "avancée" prend une dimension différente. Nous ne débattons pas ici de la nécessité de disposer d'un **modèle du procédé** au niveau supervision. L'utilisation intelligente du modèle et l'injection de connaissances sont des fondements de l'Automatique Avancée. Le modèle est une opportunité unique de faire de la capitalisation du savoir-faire tout en concentrant une grande masse de données autour de variables d'état significatives. Son emploi dans le niveau supervision est donc le moyen de mettre en oeuvre une analyse globale du système.

C'est l'objet de notre communication où le propos sera restreint à l'étude des perspectives d'évolution dans le domaine de la surveillance. Comme l'indique le titre "du discret au discontinu", nous parlerons essentiellement des **procédés batchs** dont la similitude avec les systèmes de production de l'industrie manufacturière est localisée dans le caractère discret (systèmes à événements discrets) [4].

Nous allons, dans un premier temps, faire quelques rappels sur la surveillance et fixer les interfaces avec les autres parties du système de contrôle. Dans un second temps, nous dissèrerons sur le rôle du modèle de représentation vis à vis de la fonction de surveillance, qu'il s'agisse de la **conception** du système de commande ou d'une évolution de ces systèmes vers plus de **réactivité**.

II. Définition de la surveillance

La fonction de surveillance se décline en trois temps : la **détection** d'une situation anormale, le **diagnostic** des causes et la **reprise** du pilotage [5].

II.1 La détection

Qu'il s'agisse de la partie continue ou de la partie discrète du système de commande, la démarche est semblable. C'est la cohérence entre les données rafraîchies et le modèle de supervision qui sert d'indicateur pour la détection de situations anormales. Ce modèle est alors vu comme un ensemble de **contraintes** qui doivent être satisfaites par l'état du système physique.

Pour la partie continue, correspondant à l'espace d'état des variables réelles, ce sont des fonctions qui peuvent prendre plusieurs formes. Au niveau local, la gestion des alarmes repose sur la comparaison de la variable d'état mesurée $x_M(t)$ avec des contraintes algébriques correspondant au **domaine de définition** de la variable :

$$\forall t, \quad x_L(t) \leq x_M(t) \leq x_U(t) \quad (1)$$

où x_L et x_U sont les bornes respectivement inférieures et supérieures qui représentent des seuils de tolérance prédéfinis (par exemple par une tolérance relative autour de la consigne).

Mais pour des raisons économiques ou techniques, la variable d'intérêt n'est pas toujours mesurée, l'utilisation du modèle plus évolué au niveau global sous forme d'une contrainte peut permettre d'atteindre une **estimation** de la variable d'état si elle est observable. D'autres communications de cette journée feront référence à ces **capteurs logiciels**. Dans un domaine voisin, lorsque les variables mesurées sont considérées comme des variables aléatoires obéissant à une loi de probabilité connue, la **réconciliation de données** fournit l'estimation optimale des mesures et calcule les variables non mesurées, mathématiquement observables [6]. Les tests statistiques servent à éprouver la qualité des résultats et à désigner, à partir d'un niveau de risque fixé, les capteurs défaillants [7]. Toutefois, ce niveau de traitement global de données reste encore à développer lorsque les procédés sont en régime transitoire. Dans tous les cas, les relations de type (1) peuvent être appliquées sur les variables déduites du modèle pour enrichir le processus de détection.

C'est un modèle de systèmes à événements discrets qui est utilisé pour la spécification des automates programmables. Il s'agit d'un outil mathématique représentant des relations d'ordre temporelles entre des tâches élémentaires du procédé et les mécanismes d'affectation de ressources. Les machines à états forment une première catégorie de modèles (automatismes industriels). Le Grafcet est une norme aujourd'hui très utilisée pour réaliser cette spécification. Cette méthode appartient à la famille des Réseaux de Petri [8], dont l'utilisation dans la représentation des procédés discontinus a fait l'objet de travaux par les mêmes auteurs dans le passé [9,10,11].

La détection de situations anormales pour la partie discrète correspond à la cohérence entre les signaux des capteurs tout ou rien qui appellent des évolutions logiques déterminées et l'état de l'automate, immédiatement avant la réception des signaux, qui n'autorise que certaines évolutions logiques. Si l'intersection entre les états souhaités et les états accessibles est nulle, il y a une incohérence qui est significative d'une anomalie. La contrainte est donc exprimée par la liste des événements sensibilisés du modèle, c'est l'ensemble des transitions possibles. L'événement occurrence doit appartenir à cet ensemble en situation normale. Par comparaison avec la partie continue, c'est un **ensemble de valeurs discrètes** désignant des événements attendus qui se substitue à un ensemble d'intervalles de définition des variables au niveau de la formalisation des contraintes.

Mais le modèle discret utilisé en supervision ne correspond pas à une simple agrégation de modèles discrets locaux. Le mécanisme de prise de décision tient compte des informations venant des niveaux supérieurs (gestion de production). Ce modèle est donc différent, plus riche, et la propagation de l'événement occurrence sur ce modèle est nécessaire pour détecter des anomalies vis à vis de la réalisation du plan. Nous reviendrons sur cet aspect au moyen d'un exemple.

Dans le cas d'un procédé discontinu, les boucles de contrôle locales continues et discrètes ne sont pas complètement indépendantes. L'événement d'état caractérisé par le franchissement d'un seuil sur une variable continue observable peut créer un flux d'informations au niveau du pilotage de la partie continue vers la partie discrète. De manière symétrique, la transition d'état d'un automate peut avoir pour conséquence la modification de la configuration du système qui rend des variables continues obsolètes ou les fait brusquement évoluer [12]. Toutefois, les mécanismes de détection sont peu perturbés par l'existence de ces relations.

II.2 Le diagnostic

Lorsque les mécanismes de détection ont mis en évidence une situation anormale, il est nécessaire de connaître les causes de cette situation afin de trouver une correction appropriée. Le diagnostic est une étape délicate à plusieurs titres :

- il doit souvent être entrepris dans un temps limité car la situation est évolutive et peut amener le procédé dans des états jugés très indésirables.
- il doit mettre en oeuvre un processus d'analyse pour comprendre la cause du problème à partir des nombreuses informations fournies par l'observation d'état. Le déclenchement d'une alarme est rarement un événement isolé et c'est un ensemble de signaux qu'il faut savoir interpréter pour trouver le signal d'origine et imaginer des scénarios plausibles. Cet exercice fait appel, dans la majeure partie des cas, au savoir-faire des agents de conduite qui possèdent un modèle mental de surveillance et des réflexes personnels face à chaque situation. Nous pénétrons dans le domaine de la coopération homme-machine dont l'activité consiste à combler le vide entre les données des capteurs et éventuellement des modèles mathématiques qui apparaissent sous forme numérique et les décisions de l'opérateur qui sont fondées sur des règles de comportement empiriques.

Il est prudent de considérer que l'homme ne sera jamais complètement exclus de cette phase de diagnostic. Pourtant c'est aussi dans cette phase de diagnostic que se situe aujourd'hui le challenge de la supervision avancée. La machine doit aider l'opérateur à trouver des scénarios expliquant l'évolution du procédé depuis l'origine du problème jusqu'à l'état d'anomalie observé. Et ce, pour réussir à maîtriser toutes les conséquences des solutions possibles, c'est-à-dire intégrer un caractère prédictif dans son action qui ménage au mieux les objectifs économiques, techniques et environnementaux de la production.

Dans le cas du procédé discontinu, le modèle requis pour la détection est un **modèle de bon fonctionnement**. Le diagnostic est basé sur la recherche du **modèle de défaillance**, parmi une panoplie de solutions possibles, cohérent avec le comportement constaté du système. Dans la pratique, le nombre de sources de défaillance est tel que le passage par les modèles de défaillance mène à une explosion combinatoire des calculs et se révèle impraticable vis à vis du temps accordé pour prendre une décision. L'utilisation du modèle de bon fonctionnement permet, dans un premier temps, de **localiser la défaillance** dans le temps et dans l'espace.

II.3 La reprise

Lorsque le diagnostic est établi, il faut déterminer un ensemble de décisions qui ramène l'installation dans un état de fonctionnement acceptable, c'est la reprise. Contrairement aux deux premières phases, cette étape n'utilise pas l'information passée dans ses mécanismes de fonctionnement, mais elle est fondée sur le choix d'actions permettant de revenir dans le domaine de satisfaction des contraintes du modèle de bon fonctionnement. Le modèle doit donc être utilisé pour doter la supervision d'un caractère prédictif qui permette de juger les effets des actions correctives.

L'utilisation de simulateurs discrets en ligne, ou d'algorithmes spécifiques d'ordonnement réactif, est d'usage dans le domaine du manufacturier. Ce n'est pas le cas dans les industries relevant du génie des procédés, parce que les simulateurs dynamiques sont des outils plus lourds en termes de temps de calcul et que les modèles continus sont loin d'être parfaitement représentatifs de la réalité.

Le développement d'une étape de reprise est conditionné par l'état d'avancement et les performances des étapes de détection et de diagnostic qui forment l'essentiel de notre sujet dans le cadre de cette communication.

III. Exemples de conception de modèles d'une supervision avancée

Dans cette partie, nous cherchons à montrer, au moyen d'exemples simples, comment un modèle de type Réseau de Petri peut être utilisé au niveau de la surveillance pour enrichir les capacités du système de commande au moment de sa conception (étape de spécification) ou en temps réel.

III.1 Intérêt du modèle discret vis à vis du niveau de commande locale

Les contraintes de type (1) servent à éviter l'occurrence **d'états interdits** dans la partie continue par limitation du domaine de définition des variables, nous avons vu que la même notion existe dans la partie discrète. En effet, le principe de décomposition des fonctions conduit à l'emploi de programmes indépendants dans l'automate pour chaque sous-système physique. Il ne faut pas que l'évolution parallèle des automates génère de situations indésirables. Il convient donc d'intégrer, au moment de la conception des programmes logiques, les éléments nécessaires à l'interdiction des états indésirables. La notion de superviseur discret introduite par Wonham [13] a trouvé des échos dans notre communauté [14].

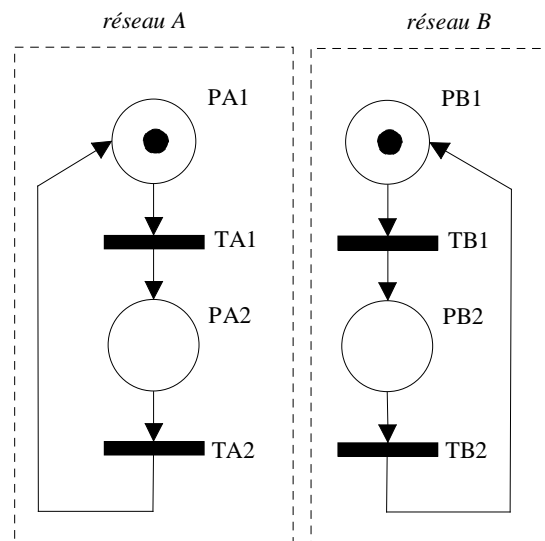


Figure 4 - Modèle des deux vannes tout ou rien

Considérons par exemple deux processus modélisés par les Réseaux de Petri de la figure 4. Chaque réseau représente une vanne tout ou rien par ses deux positions « ouverte » (PA2 ou PB2) ou « fermée » (PA1 ou PB1). La vanne A est sur une alimentation d'un équipement et la vanne B est sur un soutirage du même équipement. Les deux réseaux sont indépendants, le tir de l'un n'influe pas à priori sur le marquage de l'autre. Or, le marquage simultané des places PA2 et PB2 est un état interdit car il représente une configuration où les deux vannes sont ouvertes, configuration indésirable du procédé. Donc, si la transition TA1 du réseau A a été franchie et que le marquage est constitué d'un jeton dans la place PA2, il faut interdire le franchissement de la transition TB1 qui est initialement sensibilisée. De manière symétrique, la transition de TA1 ne doit pas être possible si PB2 est marquée.

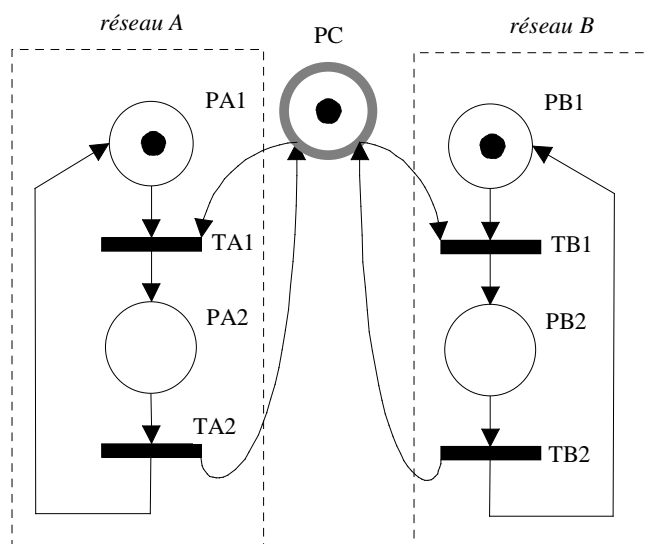


Figure 5 - Modèle du superviseur interdisant l'ouverture simultanée des deux vannes

Il est possible de maîtriser, au niveau global, le flot des jetons en ajoutant une place PC, dite de contrôle, qui modélise une exclusion mutuelle du marquage des places PA2 et PB2 (cf. figure 3). Dans l'état initial, le marquage courant (PA1, PA2 et PC) crée une situation de conflit révélatrice d'un besoin d'information externe pour réussir à trancher entre les deux réseaux pour savoir lequel aura la priorité.

Il est donc intéressant de posséder un modèle de SED au niveau de la supervision pour réussir à coordonner les interactions entre les sous-systèmes physiques. Toutefois, la simplicité de l'exemple ne doit pas cacher la complexité de cette tâche de validation de la dynamique d'ensemble du système de production. Les approches utilisées reposent soit sur des méthodes d'analyse permettant d'accéder aux bonnes propriétés du système [15], soit sur des simulations cherchant à reproduire l'ensemble des états accessibles.

III.2 Intérêt du modèle discret vis à vis du niveau de gestion

Le procédé discontinu, contrairement au procédé continu, nécessite une gestion importante du flux de produits dans l'installation. Les dates de démarrage des étapes de recettes des produits et l'affectation cohérente des équipements respectant les séquences de passage des produits sur les machines, les contraintes de nettoyage, etc.... sont autant de consignes pour le système de contrôle.

Le pilotage s'efforcera d'appliquer à la lettre le plan prévisionnel avec une surveillance divisée en deux parties. Le flot des produits est un premier niveau de gestion de l'information qui dicte ce que doit faire l'installation pour satisfaire aux objectifs du management. Le pilotage des ressources sert de relais pour la mise en place des configurations du procédé. En cas d'indisponibilité des ressources, une requête est retournée vers le pilotage du flot des produits pour obtenir une nouvelle consigne du plan.

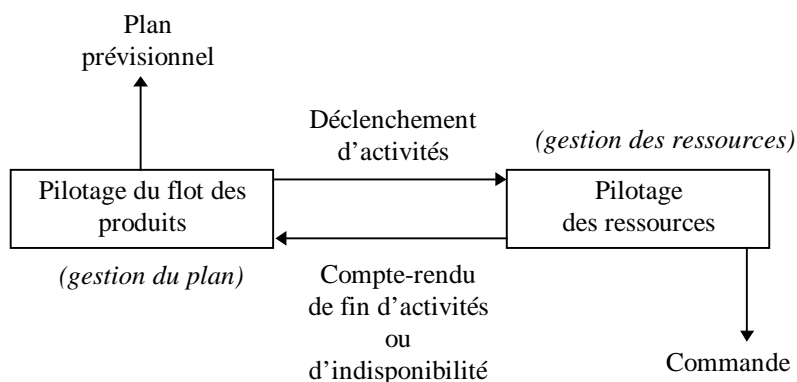


Figure 6 - Les relations du modèle de supervision modèle vis à vis du niveau supérieur

Les travaux de D.Andreu [12] ont mis en évidence l'intérêt de disposer de modèles discrets décrivant les recettes, d'une part, et permettant de gérer l'état des ressources, d'autre part. Ces deux modèles de type Réseaux de Petri communiquent au moyen d'éléments mis en commun par fusion [16].

Prenons un exemple pour illustrer cette forme de modélisation. Il s'agit de la fabrication de deux produits A et B en batch avec des recettes différentes. Le produit A doit subir une rectification pour atteindre un niveau de pureté acceptable, et cette opération se termine par un refroidissement du produit en boucle à travers un échangeur continu. Le produit B est obtenu par réaction avant de subir un refroidissement dans les mêmes gammes de température que le séparateur. Dans un souci d'économie, l'échangeur est une ressource partagée par les deux recettes.

La modélisation du flot des produits pour les séquences de tâches impliquant l'échangeur est reportée sur la figure 7.

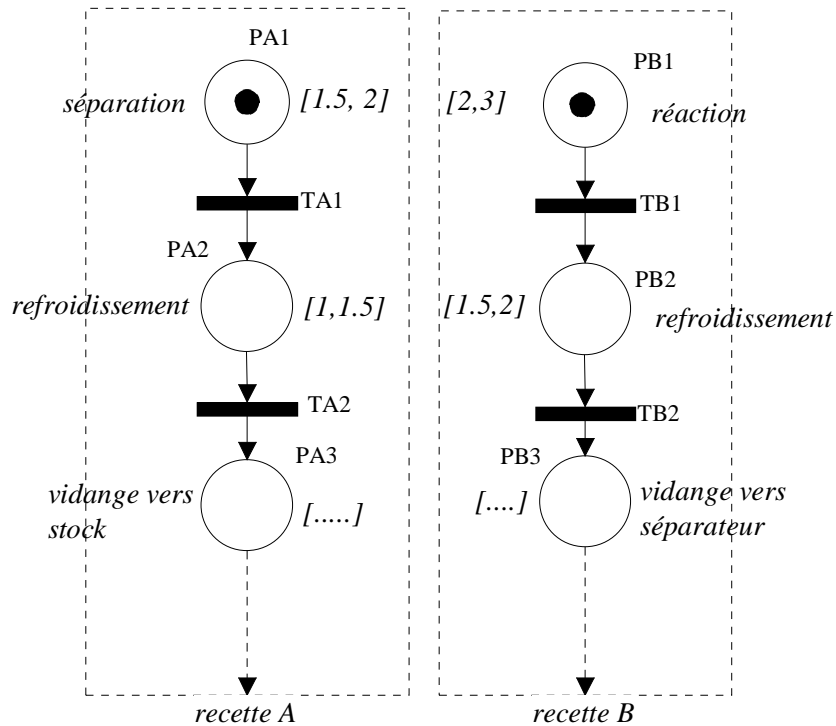


Figure 7 - Modèle discret du pilotage des produits

Pour le marquage proposé, les transitions sensibilisées (TA1, TB1) indiquent les décisions possibles pour le modèle. Le temps de séjour des jetons dans les places doit correspondre à la durée des opérations sur l'horloge de temps réel. Il existe, pour cela, des formes appropriées de variantes du modèle de base des Réseaux de Petri [17]. L'utilisation d'un de ces outils organisera le pilotage. Il fournira, en effet, la liste ordonnée de franchissements de transition correspondant aux consignes du plan.

Supposons que les durées des activités soient définies pour des intervalles de temps [durée minimale, durée maximale]. Comme nous le proposons dans la figure 8, le franchissement d'une transition (T_i) à une date déterminée d_i produit un nouveau marquage (P_i) et une liste réactualisée de transitions de sortie sensibilisées (T_{i+1}). Il devient alors possible de fixer dynamiquement les fenêtres de tir de ces nouvelles transitions par un intervalle déduit simplement de la relation suivante :

$$d_i + \text{durée minimale de } P_i \leq \text{tir de } T_{i+1} \leq d_i + \text{durée maximale de } P_i \quad (2)$$

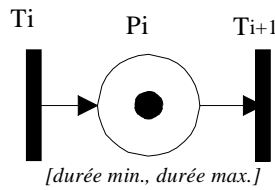


Figure 8 - Le mariage du réseau avec des données temporelles

Cette fenêtre va fixer la cohérence vis à vis du tir effectif de T_{i+1} . Si la transition est franchie en-dehors de l'intervalle, alors il y a une déviation des tâches de la recette de contrôle pour le lot correspondant par rapport aux consignes du plan.

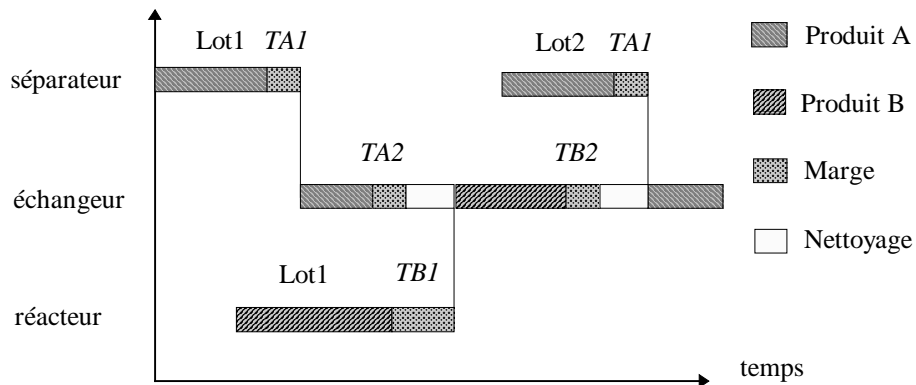


Figure 9 - Plan prévisionnel de l'exemple

Sur la figure 9, les marges reportées sur le diagramme de Gantt pour chacune des ressources correspondent à des fenêtres de tir. Contrairement à ce qu'indique cette figure, ces dates ne seront pas fixées à priori car l'addition des marges pénaliserait la productivité de l'atelier. Elles vont être calculées dynamiquement en cours de fabrication et en temps réel grâce au modèle discret pour le marquage courant. La détection d'un tir non conforme avec la fenêtre prévue permet d'envoyer un message explicite désignant le produit, le lot, la tâche et la ressource concernés.

Le pilotage des ressources permet de valider l'évolution du modèle de flots de produits puisqu'il gère les affectations de moyens. Prenons l'exemple de notre échangeur, il va être modélisé par un réseau chargé de décrire son histoire propre. Dans le RdP de la figure 10, l'échangeur a quatre états : disponible en attente (PE1), indisponible en panne (PE2), indisponible en nettoyage (PE3), indisponible en activité (PE4).

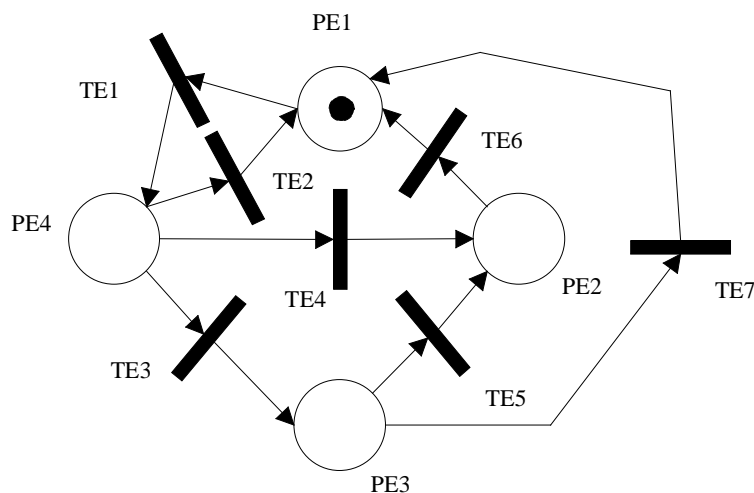


Figure 10 - Modèle discret du pilotage de la ressource

L'appareil ne peut être engagé dans une activité de refroidissement que s'il est disponible. Le marquage de la place PE1 sensibilise la transition TE1 décrivant la mise en opération de l'échangeur suite à une requête des flots de produit. Mais ce marquage est également une condition nécessaire pour l'évolution des flots de produits. Il y a donc une fusion dynamique opérée entre les transitions (TA1, TE1) ou (TB1, TE1) pour valider, de manière synchrone, l'évolution de la recette de contrôle et de l'état d'activité de la ressource.

En cas d'échec, puisque les deux formes de pilotage sont restées dissociées au niveau des modèles, le diagnostic au sens d'une localisation dans le temps et dans l'espace est facilité.

IV. Conclusions

Après avoir rappelé le rôle et la place de la supervision dans le système de commande, nous avons essayé de montrer l'apport de modèles de représentation du bon fonctionnement pour la surveillance. Cet apport se situe à deux niveaux. Le premier est la conception d'une stratégie de pilotage intégrant des contraintes de sécurité pour éviter les états interdits. L'illustration s'est faite au niveau de la coordination du contrôle local des équipements. Le second niveau est le profit tiré d'une connaissance formelle pour activer un processus de détection d'anomalie et de localisation de la défaillance. Dans cette voie, la structuration du modèle est importante et nous avons illustré son impact dans le cadre des rapports avec la gestion de production.

A ce niveau, il faut souligner que la cascade de mise à feu des alarmes mentionnée dans le texte pourra peut être explicitée par le repérage dans le temps des différents événements dont on connaîtra un ordre partiel d'occurrence grâce au modèle discret.

Le modèle de type réseau de Petri enrichi pour être marié avec l'information non purement discrète (temps, taille de lots, conditions opératoires, capacités des équipements, etc.), quelle que soit sa forme, représente un support d'un potentiel considérable dans ce cadre de travail. La coopération entre les modèles continus et discrets, qu'il est capable d'accepter, doit d'ailleurs être envisagée pour s'approcher des modes de raisonnement des opérateurs qui manipulent naturellement les deux formes de représentation dans leurs schémas de pensée. C'est un contexte de modélisation intéressant pour la conception d'outils d'aide en ligne.

Bibliographie

- [1] Norme ISA-dS88.01 « BATCH CONTROL : Models and Terminology », Draft 10, March 1994, Instrument Society of America, ISBN 1-56617-200-1
- [2] Rosenof H.P, Ghosh A., « Batch Process Automation, Theory and Practice », Van Nostrand Reinhold Company, 1987, 386 pages
- [3] Gentil S., « Systèmes d'aide à la supervision » dans « Supervision des processus à l'aide du système expert G2 », Rakoto N. et Martin A. coord., Ed. Hermes, pp 7-20, 1995
- [4] Valette R., Pingaud H., «Modélisation des procédés discontinus » , Entropie, n° 210, pp 15-21, 1998
- [5] Chaillet-Subias A., Combacau M. et coll, « Structure et surveillance pour les systèmes à événements discrets » dans « concepts et outils pour les systèmes de production », Hennet J.C. coord., Cepadues Ed., pp 243-261, 1997

- [6] Pages.A, Pingaud H., Meyer M., Joulia X., "From process simulation to general estimation ", Computers and Chemical Engineering, Vol 20, N° 12, pp1413-1424, 1996
- [7] Ragot J., Darouach M., Maquin D., « Validation de données et diagnostic », Ed. Hermes, 1990
- [8] David R., Alla H., « Du Grafset aux Réseaux de Petri », Ed. Hermes, 424 pages, 1989
- [9] Champagnat R., Andreu D., Pingaud H., Pascal J.C., Esteban P., « Modélisation des systèmes de production discontinus : proposition d'un modèle pour la supervision », European Journal of Automation, APII-JESA, Vol. 32, n°5-6, pp 725-756, Septembre, 1998
- [10] Andreu D., Champagnat R., Esteban P., Pascal J.C, Pingaud H., Valette R., « Fonctionnement et architecture des systèmes de commande hybride », dans « Concepts et outils pour les systèmes de production », Hennes J.C. coord., Cepadues Ed., pp 2213-263, 1997
- [11] Daubas B., « Modélisation et Simulation des procédés discontinus et continus », thèse INPT/ENSIGC, 1994
- [12] Andreu D., « Commande et Supervision des procédés discontinus : une approche hybride », thèse CNRS-LAAS, UPS Toulouse III, 1996
- [13] Ramadge P.J, Wonham W.M « Supervisory control of a class of discrete event processes », SIAM J. Control Optim., 25(1), pp 206-230, Janvier, 1987
- [14] Boissel O.R., Kantor J.C., « Optimal feedback control design for discrete event systems using simulated annealing », Computers&Chem. Eng. J., Vol 19, n°3, pp 253-256, 1995
- [15] Murata T., « Petri nets properties analysis and applications », Proceedings of the IEEE, Vol 77, N4, pp. 541-580, 1989
- [16] Champagnat R., « Simulation des Systèmes Dynamiques hybrides », thèse CNRS-LAAS, UPS Toulouse III, 1998
- [17] Silva M., Teruel E., Valette R., Pingaud H., « Petri Nets and Production systems », Lectures on Petri Nets II, Applications, pp 85-124, Springer-Verlag, 1998